

**Langfassung zum Fachvortrag auf dem
8. Internationalen Symposium „Werkstoffe aus Nachwachsenden Rohstoffen“
Sektion 4“Holzwerkstoffe“, 10.09.2010, 9:00 Uhr**

Titel:

"Einblick in die Geschichte der Holzwerkstoffe im Maschinen- und Anlagenbau und aktuelle Möglichkeiten der angemessenen technischen Nutzung"

Autoren:

Dipl.-Ing. Sven Eichhorn / Dipl.-Ing. Ronny Eckardt / Dipl.-Ing. Christoph Müller
Professur Fördertechnik, Institut für Fördertechnik und Kunststoffe, Fakultät für Maschinenbau,
Technische Universität Chemnitz

Kontakt:

sven.eichhorn@mb.tu-chemnitz.de
ronny.eckardt@mb.tu-chemnitz.de
christoph.müller@mb.tu-chemnitz.de

Kurzfassung:

Der Einsatz von Holz- und speziell Holzfurnierlagenverbundwerkstoffen (WVC) konzentrierte sich in den vergangenen Jahrzehnten nahezu ausschließlich auf den Möbelbau und den Bausektor. Eine Verwendung von Holzwerkstoffen im Sinne einer angemessenen technischen Nutzung der vorhandenen Eigenschaften im Maschinen- und Anlagenbau wird hingegen aktuell kaum praktiziert.

Der Vortrag zeigt anhand der Darstellung und Analyse des Standes der Technik Einsatzmöglichkeiten des Werkstoffes im Maschinen- und Anlagenbau auf und charakterisiert dabei die Bereiche, in denen noch verstärkt gearbeitet werden muss, um diese Einsatzmöglichkeiten angemessen nutzen zu können.

Weiterhin werden grundlegend relevante Werkstoffeigenschaften für das angestrebte Einsatzgebiet charakterisiert und erste Einblicke in Bauformen aus WVC gegeben, mit denen ein praktischer Einsatz im Allgemeinen Maschinenbau und damit in der Fördertechnik technisch sinnvoll ist.

Abstract:

For the last decades the usage of plywood materials (Wood Veneer Composites) was mainly focused on furniture and civil engineering. At the moment there is no adequate technical use of wood based materials in mechanical engineering in respect to its particular properties. Following the state of the art several fields of application in mechanical engineering are presented as well as subjects were identified which need further investigation.

Relevant material properties for the aspired technical application are characterized. Furthermore an insight in realized designs of WVC structures is given.

1. Holzwerkstoffe in der Geschichte des Maschinen- und Anlagenbaus

Holz ist hinsichtlich der Geschichte der Technik ein traditionsreicher Werkstoff. Aufgrund des breiten Spektrums an Werkstoffeigenschaften und unter dem Gesichtspunkt, der aktuell mit dem Begriff „nachwachsender Rohstoff“ beschrieben wird, war der Werkstoff für viele Menschen in der Vergangenheit kostengünstig, meist ausreichend verfügbar und leicht zu bearbeiten. Die Menschheit nutzte das Holz in den zurückliegenden Zeitabschnitten der technischen Entwicklung auf vielfältige Art und Weise.

Die Vorboten aktueller Maschinen- und Anlagenbauten werden unter anderem durch die Erfindungen des Leonardo da Vinci¹ (z.B. Balliste) und die als „Wasserkunst“ im Silberbergbau verwendeten Fördermaschinen (z.B. Wasserrad) von Georgius Agricola² im 15. und 16. Jahrhundert beschrieben.

Im 18. und frühen 19. Jh. erlebte das ‚Hölzerne Zeitalter‘ seinen Höhepunkt³. „Ausgehend von den baltischen Staaten begann 1870 die Sperrholzherstellung in Berlin“⁴. Dadurch wurde die Unannehmlichkeit des Quellens und Schwindens von Vollholz merklich reduziert und zudem die Qualität des Holzwerkstoffes verbessert.

Mit der Verbreitung der Dampfmaschine und der Kohle als Energieträger, kam es zum massenhaften Einsatz von Erzeugnissen aus Stahl. „Am Ende des 1. Weltkrieges begann zudem eine fieberhafte Suche nach neuen Verwendungsmöglichkeiten für die aufgeblähten Kapazitäten des Aluminiums“⁵.

Mitte des 19. Jahrhunderts nahm durch die Naturabkömmlinge Celluloseester, mit Bluteiweiß (Albumin) gehärteten Holzmehl sowie mit Formaldehyd vernetzten Milcheiweiß (Kasein) die Frühzeit der Kunststoffe ihren Anfang. In Verbindung mit dem 1910 durch Richard Escales eingeführten Begriff Kunststoff begann von 1911-1960 die Neuzeit dieser Werkstoffgruppe. Erste synthetische Kunststoffe wie Phenoplaste, Aminoplaste, Thermoplaste (Polyvinylchlorid, Polystyrol, Polyethylen, Polypropylen), UP-Harze, Polyamide und Synthesefasern wurden hergestellt. In Verbindung mit der Begründung der Polymerwissenschaften durch H. Staudinger und der damit verbundenen Erforschung der Struktur und Eigenschaften dieser Werkstoffe wurde die Gegenwart der technischen Kunststoffe (Epoxidharz, Polycarbonat, Elastomere, Verbundwerkstoffe) eingeleitet.⁶ Durch die stetig voranschreitenden Entwicklungen der Werkstoffe Kunststoff und Metall wurde der Werkstoff Holz kontinuierlich verdrängt.

Im Jahre 1936 beschrieb Franz Kollmann die Situation wie folgt: „Eine groß angelegte Umfrage bei breiten Industriekreisen ergab ..., dass es (das Holz⁷) als Werkstoff im Maschinenbau noch häufig vertreten und wegen seiner besondern Vorzüge in vielen Fällen unentbehrlich ist.“⁸ Anwendungsbeispiele für Holz im Maschinen- und Anlagenbau waren dabei bis dato: Segelschiffe⁹, Seilflechtmaschinen für Taue¹⁰, Wasserräder (vgl. Agricola), Belagerungstechnik (vgl. da Vinci), raketenbetriebener Abfangjäger im 2. Weltkrieg (Bachem Ba 349, Bachem „Natter“)^{11, 12}, Holzkarossen im Automobilbau (DKW¹³, Modell F5-sport, F7, F8), Rahmen für Motorräder (z.B. Hoco/DKW¹⁴), Flugzeug bzw. Segelflugzeuge¹⁵ (Bild 1), Zahnräder für Uhren, Seechronometer, Lager¹⁶, Holzbottichwaschmaschinen¹⁷, Holzrohre in Wasserleitungen¹⁸, Karden (Verarbeitungsmaschine zur Aufbereitung von Baumwollfasern)¹⁹, Webmaschine für derbe Gewebe aus dünnen Seilen²⁰ und Webschützen²¹ in Textilmaschinen.

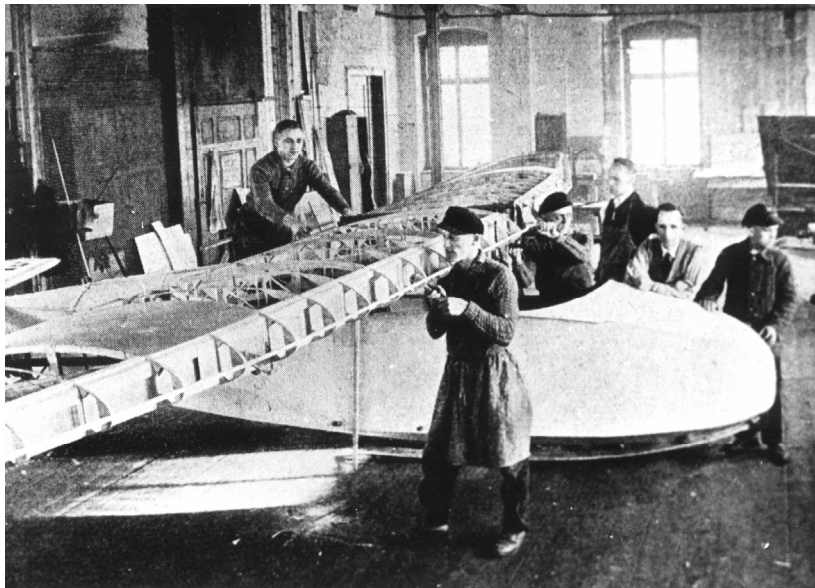


Bild 1 Ausbildung Segelflugzeugbau, Staatliche Akademie für Technik Chemnitz, Zeitraum ca. 1930-39²²

2. Aktuell angemessene Einsatzmöglichkeiten von Holzwerkstoffen

In seiner Bedeutung als Konstruktionswerkstoff wurde das Holz nach dem Zweiten Weltkrieg nahezu vollständig in die Bereiche Möbelbau und Bauwesen (konstruktiver Ingenieurholzbau) verdrängt. Erst seit Ende des 20. Jahrhunderts erfolgte über die historischen Einsatzgebiete, beginnend bei der Fördertechnik als Schnittstelle zum Bauwesen, eine Wiederbelebung. Beispiele dafür sind: Streusalzsilos²³, Salzlagerhallen²⁴, Förderbrücken²⁵, Personenfördertechnik in Form einer Achterbahn²⁶, Wasserleitungen²⁷ und Masten für Windkraftanlagen²⁸.

In technischen Anwendungen des Maschinen- und Anlagenbaus werden darauf aufbauend erste Prototypen von Verarbeitungsmaschinen (z.B. Fräsmaschine R. Eppe²⁹, Fräs-Graviermaschine S. Welschhoff³⁰), Teile von Fahrzeugen (z.B. Conceptcar „Nios“³¹), oder Fahrradrädern³² wieder aus Holzwerkstoffen gefertigt. Diese Rückkehr zur Holzbauweise wird hauptsächlich mit ökologischen (Nachhaltigkeit, Recycelfähigkeit, nachwachsender Rohstoff), designtechnischen (ansprechende Optik und Haptik) und kaufmännischen (Preis, Verfügbarkeit) Aspekten gerechtfertigt. Konstruktionstechnische oder werkstoffwissenschaftliche Belange sind meist untergeordnet.

„Holz ist auf mikroskopischer Ebene ein Nanoverbundwerkstoff, vereinfacht chemisch gesehen ein Bioverbundpolymer, bestehend aus den Polymeren Lignin, Cellulose- bzw. Hemicellulose“³³. Die Cellulosen sind dabei räumlich in Faserform im Lignin verteilt, was auf makroskopischer Ebene der Charakteristik eines faserverstärkten Polymers bzw. Faserverbundwerkstoffes entspricht. Holz besitzt eine charakteristische, anisotrope Faserstruktur. Durch die „großen Fortschritte auf dem Gebiet der Erforschung von Struktur-Eigenschafts-Beziehungen in den letzten 20 Jahren (Aufschwung der Holzphysik)“³⁴ in Verbindung mit aktuellen Fertigungsverfahren, ist der Werkstoff im Vergleich zur Vergangenheit technisch beherrschbarer geworden. „Die strukturelle Anisotropie des Holzes kann somit mehr als Chance“³⁵ für die Anwendungstechnik des Werkstoffes begriffen werden und weniger als Defizit. „Der Wissensstand und die Umsetzung sind jedoch noch gering, aber es wurden große Fortschritte in den letzten 10 Jahren erreicht.“³⁶

Angemessene Anwendungen, nutzen die historisch bekannten Vorteile des Holzes, wie

- die guten Bearbeitbarkeit bzw. Verfügbarkeit
- die vergleichsweise geringen Kosten bei der Halbzeug- bzw. Bauteilherstellung
- dem Nachhaltigkeitspotenzial in Kombination mit einem angepassten Recyclingkonzept

und verbinden diese mit den Eigenschaften des Werkstoffes, die unter aktuellen Gesichtspunkten einen technischen Mehrwert generieren. Beispielhaft dafür seien genannt:

- die mechanisch vorteilhaften Festigkeiten bezüglich der Dichte (spezifische Größe)
- die Vorteile hinsichtlich Schwingungs- und Geräuschkämpfung
- der geringe Materialabbau unter Einwirkung bestimmter aggressiver Reagenzien (z.B. Salzen)
- die verminderte Temperaturdehnung.

„Holz besitzt im Vergleich zu unlegiertem Stahl im Bereich des pH-Wertes $2 < \text{pH} < 9$ unter Beachtung der Einwirkungszeit, -temperatur und -konzentration eine hohe Resistenz gegenüber unterschiedlichen Chemikalien. Somit auch bei Salzen in flüssiger (Sole) und fester Form (z.B. Streusalz).“³⁷ Ergänzend dazu dient der zelluläre Aufbau von natürlichen Werkstoffen wie Holz oder Knochen und deren Eigenschaften als Vorbild für besonders schwingungsdämpfende Schäume aus Metall.³⁸ „Die geringe thermische Ausdehnung und Wärmeleitung von Holz ermöglicht es, in Verbindung mit der Eigenschaft eine zusätzlich isolierenden Holzkohleschicht im Brandfall auszubilden, tragenden Bauteile und Konstruktionen feuerfester zu bauen als aus Stahl, vorausgesetzt die Querschnittsabmessungen sind hinreichend groß.“³⁹

Ein Ansatz, diese Eigenschaftskombination angemessen zu nutzen stellt ein modulares Baukastensystem für ein Maschinengestell dar. Die Modularität gilt dabei für den Werkstoff und die Bauweise. Dadurch ist es möglich, eine dem Einsatzfall entsprechende, vorteilhafte Anpassung vorzunehmen. Durch diese integrative Bauweise entsteht durch die Verwendung von Holzwerkstoffen ein technischer Mehrwert.

3. Modulare Werkstoffe – integrative Bauweisen – ein Lösungsvorschlag

Holz ist ein umgangssprachlicher Oberbegriff. Der Werkstoff ist immer eine Kombination aus mehreren Materialien, speziell Polymeren (Cellulosen, Lignin) und Zusatzstoffen (z.B. Wasser, Mineralstoffe, Extraktstoffen⁴⁰) in einem Verbundwerkstoff. Dadurch ist über jede Holzart und damit dem Zell-(Anordnung, Form) bzw. dem Stammaufbau (Kern- Splintholz) eine neue Variante des Verbundwerkstoffes Holz verfügbar. Es existieren ca. 40.000 bekannte Holzarten, von denen „etwa 1500 bisher näher beschrieben wurden“⁴¹, um anhand charakteristischer Merkmale im Aufbau eine Differenzierung z.B. in Laub- oder Nadelholz vornehmen zu können. Die hohe Variantenvielfalt ist ein

Grund für die oftmals als Kompliziertheit missverstandene Komplexität des Holzes. Diese Komplexität bietet jedoch die Möglichkeit, in Verbindung mit einer hohen Kombinationsfreiheit im Aufbau, einen maßgeschneiderten und damit modularen Werkstoff zu gestalten.

Dieser Ansatz ist durch die Wiederbelebung und inhaltliche Weiterentwicklung des traditionell als Lagenholz bekannten Holzfurnierlagenverbundwerkstoffes (WVC Wood-Veneer-Composite) möglich.

Ähnlich dem heute bekannten technischen Faserverbund können dabei einzelne Schichten, in diesem Fall Furnier, verschiedener Dicke und Holzart unter beliebigem Faserwinkel in einem Halbzeug definierter Form (Platte, spezielle Form), mit Additiven (Fungizide, Pestizide, Flammschutz, usw.) versetzt, verklebt bzw. mit einem aushärtbaren oder nicht aushärtbaren natürlichem oder künstlichem Polymer getränkt oder beschichtet und anschließend verpresst werden. Dabei ist auch die Kombination von jeweils vergüteten Einzelschichten (z.B. verpresst, unverpresst) möglich. Eine zusätzliche Erweiterung dieser Begriffsbildung wäre durch die Verwendung von anderen natürlichen (z.B. Flachs-) oder künstlichen (z.B. Kohle-, Glas-) Faserwerkstoffen zwischen den Holzschichten denkbar. Aufbauend auf diesen modularen Werkstoffen ist es möglich in der Bauweise speziell Anpassungen an Umwelteinflüsse (z.B. aggressive Reagenzien), Belastungen und benötigte Funktionen (z.B. Dämpfung) vorzunehmen und diese damit integrativ zu gestalten.

Ein Weg diesen Ansatz konkret in die Praxis umzusetzen, besteht im integrativen Leichtbau eines modularen Maschinengestelles⁴² für die Verwendung in Verarbeitungs- und Transportmaschinen. Der grundlegende Lösungsansatz beruht auf der Annahme, dass Holz unter aktuellen Gesichtspunkten als ein kostengünstiger, spezifisch mechanisch vorteilhafter und energieeffizienter Konstruktionswerkstoff darstellbar ist. Die bessere Primärenergieausnutzung soll bei der Umsetzung der modularen Bauweise ein Mehrwert generieren, welcher Ansätze für einen nachhaltigen⁴³ Maschinen- und Anlagenbau liefert. Im Ergebnis dessen sollen verwendete metallische Materialien (z.B. Baustahl S235JR, Aluminiumlegierung AlMgSi0,5⁴⁴) sinnvoll ergänzt werden. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, über die Holzeigenschaften wie verminderte Temperaturdehnung, Widerstand gegenüber aggressiven Reagenzien, vorteilhafte Schwingungsdämpfung, den integrativen Aspekt dieser Anwendung inhaltlich auszufüllen. Ausgangspunkt der konstruktiven Betrachtungen ist der in Bild 2 dargestellte Zusammenhang.

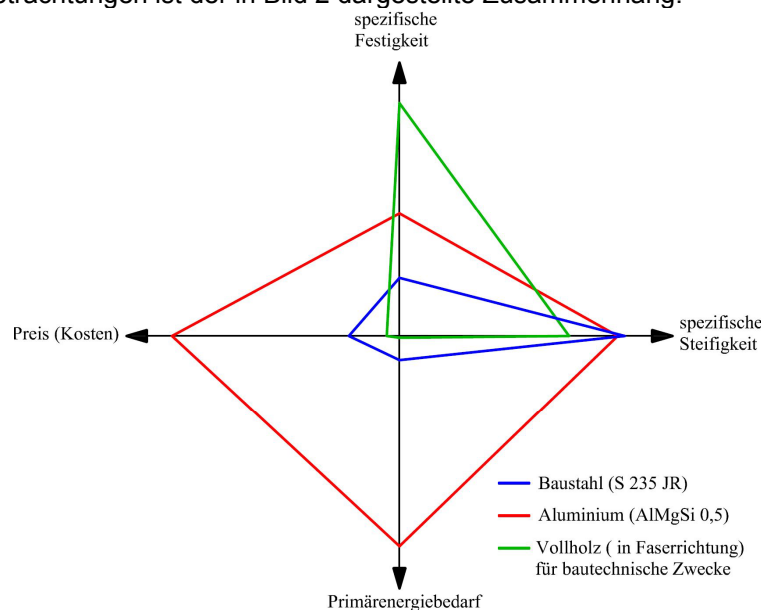


Bild 2 Ausgangspunkte der werkstofftechnischen Betrachtungen⁴⁵

Vollholz (für bautechnische Zwecke, Durchschnittswert faserlängs) besitzt hohe (spezifische Festigkeit) bzw. sehr hohe Vorteile (Primärenergie, Preis) Vorteile gegenüber den Metallwerkstoffen Aluminium (AlMgSi0,5) und Baustahl (S235JR). Es bestehen jedoch Nachteile im Punkt der spezifischen Steifigkeit.

Die daraus abgeleitete modulare Bauweise nutzt die technisch vorteilhaften Holzeigenschaften. Die notwendige Struktursteifigkeit wird über angepasste Flächenträgheitsmomente erreicht. Die Gestellstruktur besteht aus Hohlprofilen. Durch die Kombination mit der Verbindungstechnik ist es möglich Zusatzkomponenten im Gestell zu integrieren und eine geschlossene Bauweise zu erreichen. Erste Prototypen wurden als Transportmaschinen (Kettenförderer, Rollenbahn) umgesetzt.

4. Zusammenfassung

Die aktuellen gesellschaftspolitischen Entwicklungen zur Klima- und Effizienzdebatte, unter dem Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit, eröffnen eine Möglichkeit für die Rückkehr des Holzes in Anwendungen des Maschinen- und Anlagenbaus. Ein langfristiger Trend lässt sich über diesen „Ökobonus“ jedoch nur generieren, wenn die vorhandenen Vorteile des Holzes in konkrete, technische sinnvolle und wirtschaftlich vertretbare Lösungen überführt werden. „Öko“ allein wird über die Zeit nicht ausreichen, um den Werkstoff aus der aktuellen Mode heraus wieder langfristig zu etablieren. Dafür ist die Akzeptanz in den Köpfen der verantwortlichen Maschinen- und Anlagenbauer (noch) nicht vorhanden und die Konkurrenz durch andere Werkstoffe zu groß. Holz wird bestenfalls mit einem CO₂-neutralen Energiespender, geringer Leistungsfähigkeit und komplizierten technischen Gebrauch gleichgesetzt. Ein Blick in die Geschichte zeigt bereits: „Die Behauptung oder gar die Erweiterung der Stellung des Holzes im Maschinenbau (wird)⁴⁶ davon abhängen, ob es gelingt, den schaffenden Ingenieuren und dem technischen Nachwuchs seine Eigenschaften und Verwendungsmöglichkeiten klar zu schildern und seine Vorteile zu beleuchten.“

⁴⁷ Die historisch verfügbaren Bauweisen und Werkstoffe müssen deshalb wieder bekannt und vor allem hinsichtlich aktueller Anforderungen weiter entwickelt werden. Eine Möglichkeit dieser Entwicklung stellt die Verwendung des traditionellen Lagenholzes als WVC in Kombination mit dem Ansatz einer integrativen Bauweise (z.B. dem integrativen Leichtbau) in modularen Maschinengestellen für die Verwendung in Transport- und Verarbeitungsmaschinen dar. Weiterhin ist es notwendig, die Zusammenarbeit und Vernetzung der Akteure im Bereich Holz weiter voranzutreiben, um die Qualität bzw. Herstellung der benötigten Holzwerkstoffe zu sichern.

5. Literatur:

¹ H. Anna Suh, „Leonardo da Vinci Skizzenbücher“, Black Dog a. Leventhal Publishers Inc., 2005, S 253 ff

² Georgius Agricola, „De Re Metallica Libri XII – Zwölf Bücher vom Berg- und Hüttenwesen“, marixverlag, 2. Auflage 2007, S 124 ff

³ Joachim Radkau A), „Holz Wie ein Naturstoff Geschichte schreibt“, oekomverlag, 2007, S 132

⁴ ebd. Radkau A), S 247

⁵ Frank Uekötter, „Vom Raffen und Rauben“, politische ökologie 115/116: Ressourcen Die Geschichte der Ressourcennutzung - Kampf um knappe Schätze

⁶ D. Braun, „Renewable Raw Materials: History of Plastics“, 8 th Global WPC an Natural Fibre Composites Congress and Exhibition, 2010, PL3

⁷ Anmerkung Verfasser

⁸ Franz Kollmann, „Holz im Maschinenbau“, Mitteilungen des Fachausschusses für Holzfragen beim Verein deutscher Ingenieure und Deutscher Forstverein, Heft Nummer 16, 1936, S 1

⁹ Dauerausstellung Marinemuseum Karlskrona, Schweden Stand 2008

¹⁰ ebd. Marinemuseum

¹¹ Achim Schnurrer „Höllennritt auf der Holzrakete“, http://einestages.spiegel.de/static/topicalbumbackground/6219/hoellenritt_auf_der_holzrakete.html, Stand 01/2010

¹² Deutsches Museum München, <http://www.deutschesmuseum.de/sammlungen/verkehr/luftfahrt/strahlflugzeuge/bachem-natter/>, Stand 01/2010

¹³ ebd. Kollmann, S 55

¹⁴ Motorrad Museum Schloss Augustusburg, Dauerausstellung, Stand 2009

¹⁵ ebd. Kollmann, S 57

¹⁶ Jürgen Aberler, „Die Nachbildung von Harrisons Seechronometer H1“, Alte Uhren 1/1984, S 11-22

¹⁷ Joachim Radkau B), „Technik in Deutschland Vom 18. Jahrhundert bis heute“, Campus Verlag, 2008, S 334

¹⁸ WIMAD, Verein für Wissenschaftler und ingenieurtechnische Mitarbeiter Dresden e.V., Blätter zur Wassergeschichte, Blatt 1 und 2

¹⁹ ebd. Radkau B), S 219

²⁰ ebd. Marinemuseum

²¹ ebd. Kollmann, S 52

²² Universitätsarchiv der TU Chemnitz (UAC 502/999), aus Festschrift Staatliche Akademie für Technik Chemnitz 1836-1936, S.97

²³ Blumer - Lehmann AG Schweiz, Streusalzsilos in Chemnitz' Internetauftritt http://www.blumer-lehmann.ch/pdf/silobau/bl_silo_d_chemnitz.pdf, Stand Februar 2009,

-
- ²⁴ Informationsdienst Holz: „Dauerhafte Holzbauten bei chemisch-aggressiver Beanspruchung“ holzbau handbuch Reihe 1 Teil 8 Folge 2, S20 ff
- ²⁵ Peter Pulsfort, „Optimiertes Antriebskonzept für hochkorrodierendes Schüttgut – Fördertechnik mit Salzkruste“ Schüttgut Spezial Tagebautechnik 2004
- ²⁶ Holzachterbahnen z.B. Colossos- Heide-Park Soltau Internetauftritt Intamin AG http://www.intaminworldwide.com/iag/index.php?option=com_content&task=view&id=36&Itemid=32, WOODEN COASTER, Stand 02/2009,
- ²⁷ Peter Fellmoser, Druckrohrleitungen aus Holz - Anwendung und Bemessung, Dissertation TH Karlsruhe 2007
- ²⁸ Gregor Prass, „Timbertower -Türme aus Holz für Windkraftanlagen“, Holzbau-Magazin 2009
- ²⁹ DER KONSTRUKTEUR 11/98 bzw. <http://www.holz-cnc-epple.de/>, Stand03/2010
- ³⁰ <http://www.cnc-wood.de/>, Stand 03/2010
- ³¹ <http://www.projekt-hydrokultur.de>, Stand 03/2010
- ³² <http://www.waldmeister-bikes.de/de/>, Stand 12/2009
- ³³ In Anlehnung an Oskar Faix, aus A.Wagenführ, F. Scholz „Taschenbuch der Holztechnik, Hanser Verlag 2008“, S47
- ³⁴ Peter Niemz, Daniel Keunecke, Walter Sonderegger, Tamas Hofmann „Beziehungen zwischen Struktur und ausgewählten physikalischen Eigenschaften von Holz“, Fachvortrag zum Holzanatomisches Kolloquium, Dresden 30.01.09
- ³⁵ André Wagenführ, Beate Buchelt, „Die strukturelle Anisotropie von Holz als Chance für technische Innovationen“, Holzanatomisches Kolloquium, Dresden 01/2009
- ³⁶ ebd. Niemz, Keunecke, Sonderegger, Hofmann
- ³⁷ Informationsdienst Holz „Holzhandbuch Reihe 1 Teil 8 Folge 2 - Dauerhafte Holzbauten bei chemisch aggressiver Beanspruchung“, Dezember 2002 S7ff
- ³⁸ DFG Schwerpunkt „Zelluläre metallische Werkstoffe“ Onlineauftritt IFW TU Braunschweig, http://www.ifw.tubs.de/ifw/deutsch/forschung/neue_werk/mech_daempfung_met_sch/index.htm, Stand 02/2009
- ³⁹ Niemz, Peter: „Thermische Eigenschaften-Brandverhalten“, Holzphysik- Skript zur Vorlesung, 2006,S15 bzw. in Andre Wagenführ, Frieder Scholz, „Taschenbuch der Holztechnik“, Carl Hanser Verlag 2008, S171
- ⁴⁰ ebd. André Wagenführ, Frieder Scholz, S47 ff
- ⁴¹ Rudi Wagenführ „HolzAtlas“, Fachbuchverlag Leipzig 2006, S36
- ⁴² Ronny Eckardt, Sven Eichhorn "Konstruktion und Erprobung modularer Maschinengestelle aus Holz furnierlagenverbundwerkstoff (WVC)", 8. Internationalen Symposium „Werkstoffe aus Nachwachsenden Rohstoffen, 2010
- ⁴³ in Anlehnung an den klassischen Begriff der Nachhaltigkeit : Hans Carl von Carlowitz, Freiberg 1713
- ⁴⁴ Diese Werkstoffe sind mit guter Nährung als Basiswerkstoffe der Fördertechnik bzw. des Allgemeinen Maschinenbau zu sehen, da sie sehr oft Verwendung finden.
- ⁴⁵ Zusammenstellung durch Verfasser:
- spezifische Faktoren mechanischer Kennwerte und Dichten für Holz aus Mittelwerten für europäisches Nutzholz (längs der Holzfaser) (DIN 68346) / für Metall: Baustahl S235 JR (ST 37) Westermann Metalltechnik, 3. Auflage 1992 S128, Aluminium AlMgSi0,5, S 135
 - Preise für Mitte 2007: Holz- LB-055 pro Tonne Lumber Cont (www.rohstoffwelt.de), Dichte 0,6g/cm³, damaliger Dollarkurs in Euro und Tonne umgerechnet / Stahl -Mittelwert Formstahl Breitflanschträger bis 300mm– Grundpreis pro Tonne - info Stahl Marktpreisauskunft auf Verlangen von Bundes-, Landes, und Gemeindebehörden 2007 /Aluminium- www.taprofessional.de – Chart für Aluminium
 - Primärenergiebedarf: Mittelwerte zusammengestellt aus: Zur Entwicklung des Holzbaues, W. Rug, Helge Schmidt, Holztechnologie 30 (1989) 4 S 186-193, Rug, W.; Pötke, W.: "Raumfachwerk aus Rundholz" Holztechnologie - Leipzig 30 (1990) 6 S287, zitiert nach Ressel J.: Zur aktuellen Lage der Holzindustrie in der BRD Holz Zentralblatt Leinfelden Echterdingen 111 (1985) S1012-1013, Herstellung der Metallwerkstoffe aus Erz
- ⁴⁶ Anmerkung Verfasser
- ⁴⁷ ebd. Kollmann, S 1